

COMPARACIÓN DE DOS SISTEMAS DE REFRESCAMIENTO DE INVERNADERO¹ HIDROPÓNICO MEDIANTE TORRES DE EVAPORACIÓN

P. Robredo², R. Echazú³, M. Quiroga⁴ y L. Saravia⁵

INENCO⁶

Universidad Nacional de Salta

Buenos Aires 177 - 4400 Salta, Argentina

FAX 54-387-4255489, e-mail : echazur@inenco.net

RESUMEN: Se presentan comparativamente los resultados del ensayo de dos sistemas en circuito cerrado, llamados directo e indirecto, aplicables al enfriamiento de la solución para cultivos hidropónicos en invernaderos. Ambos sistemas comprenden una torre de enfriamiento, exterior al invernadero, y una pileta de cultivo con solución hidropónica, la que en el dispositivo indirecto, incluye un intercambiador de calor colocado en su fondo. En el sistema directo, la solución se enfría mediante su circulación a través de la torre, mientras que en el indirecto, lo hace entregando calor a un intercambiador por el que circula agua que a su vez se enfría directamente en la torre.

El análisis incluye el efecto sobre la solución hidropónica y el balance térmico para ambos diseños, como así también la caracterización del relleno, necesaria para posteriores dimensionamientos.

PALABRAS CLAVE: Hidroponia-Enfriamiento evaporativo- Solución hidropónica-Acondicionamiento térmico

INTRODUCCIÓN

El acondicionamiento térmico de los invernaderos se realiza debido a que los mismos requieren mantener en su interior temperaturas considerablemente más altas que la ambiente durante el invierno, y más bajas que la ambiente durante algunas horas del día en los meses de verano.

El calentamiento invernal de invernaderos constituye una práctica más o menos corriente, que se lleva a cabo mediante sistemas tradicionales, como quema de leña y/o combustibles, con un alto costo tanto económico como ambiental. Alternativamente a estos sistemas se han realizado diversas experiencias de calentamiento invernal, mediante la acumulación de energía solar durante el día, por ejemplo en agua o piedra, Saravia et al (1996,1997) para entregar durante la noche este calor al invernadero. De una manera u otra el calentamiento constituye un problema con soluciones posibles.

Un tema aparte es aliviar el sobrecalentamiento en verano de los sistemas de cultivo bajo cubierta. Corrientemente los productores recurren al sombreado o enclavado de las estructuras y a la ventilación pasiva o activa. En sistemas altamente tecnificados se aplica desde "Cooling System" con paneles de enfriamiento evaporativo, o sistemas de nieblas intermitentes, hasta sofisticados sistemas de circulación de agua por los techos de los invernaderos. Los sistemas de sombreados y ventilación pueden llevar la temperatura a niveles similares a la del ambiente exterior del invernadero. Los sistemas más sofisticados tienen habitualmente costos y tecnología que en general no están al alcance de los productores, y deben ser perfectamente dimensionados, caso contrario su efecto no es muy diferente del obtenido mediante sombreado.

Con todo, el enfriamiento de invernaderos, a temperaturas inferiores a la del ambiente, continúa siendo un gran problema sobre el cual es necesario profundizar y buscar soluciones y es la causa de que cientos de hectáreas de invernadero no se trabajen en este período, con el consiguiente daño productivo y económico.

Desde hace algunos años, en INENCO, se viene trabajando con el condicionamiento térmico de sistemas de cultivo hidropónico bajo invernadero, con el objetivo general de lograr un sistema que funcione todo el año, y con técnicas de cultivo probadas y un alto nivel de automatización, de modo de facilitar su transferencia y aplicación con perspectivas comerciales. Para lograr estos objetivos, es necesario adecuar las temperaturas tanto ambientes como de solución nutritiva a las exigencias del cultivo.

¹ Parcialmente financiado por el Consejo de Investigación de la Universidad Nacional de Salta y por el FONCYT (SECYT)

² Docente de la Fac. de Ciencias Naturales de la UNSa - ³Personal del CIUNSa.- ⁴Personal del CIUNSa

⁵ Profesional Principal del CONICET ⁶ Instituto UNSa - CONICET

Los ensayos se realizan principalmente con cultivos de lechuga, que por su ciclo corto permite obtener resultados en breve tiempo. Este cultivo, si bien tiene alta resistencia a heladas, requiere una temperatura moderada en invierno, pero las altas temperaturas de verano resultan limitantes. Para el control térmico en verano, en los invernaderos hidropónicos, se ha recurrido a sistemas de sombreado y de enfriamiento del aire del interior.

El presente trabajo es continuación de experiencias realizadas en el mismo invernadero en años anteriores. Tiene por objetivo principal ensayar comparativamente dos sistemas en circuito cerrado, aplicables al refrescamiento de la solución hidropónica de cultivo. Un sistema nuevo, directo, en el cual la solución nutritiva se enfría directamente en una torre con flujo de aire en contracorriente y uno indirecto, ya ensayado, en el que la solución se enfría entregando calor a un intercambiador inmerso en la pileta de cultivo, por donde circula en circuito cerrado, agua que a su vez es enfriada en la torre. Se evalúa la eficiencia de ambos dispositivos, verificando el efecto del sistema directo sobre la solución nutritiva. Se caracteriza el material de relleno de las torres, dato necesario para la posterior etapa de dimensionamiento de la misma.

Finalmente, se realiza el balance térmico para ambos diseños.

MATERIALES Y METODO

La presente experiencia se llevó a cabo en uno de los invernaderos hidropónicos que el INENCO ha construido en el predio de la Universidad Nacional de Salta, en Castañares.

Se ensayaron comparativamente dos sistemas de enfriamiento.

1.- Directo: Consiste en un circuito cerrado formado por una torre de enfriamiento, situada en el exterior del invernadero, y una pileta de cultivo con solución hidropónica. El enfriamiento se logra mediante la circulación de la solución nutritiva a través de la torre.

2.- Indirecto: Consiste en un circuito cerrado, también integrado por una torre de enfriamiento, externa al invernadero, y un intercambiador de calor dentro de una de las piletas de cultivo. Este sistema ya fue usado en experiencias anteriores. En este caso se logra enfriar la solución hidropónica mediante la circulación de agua en un circuito cerrado, desde el intercambiador hacia la torre.

En la figura 1 se muestra un esquema de ambos sistemas.

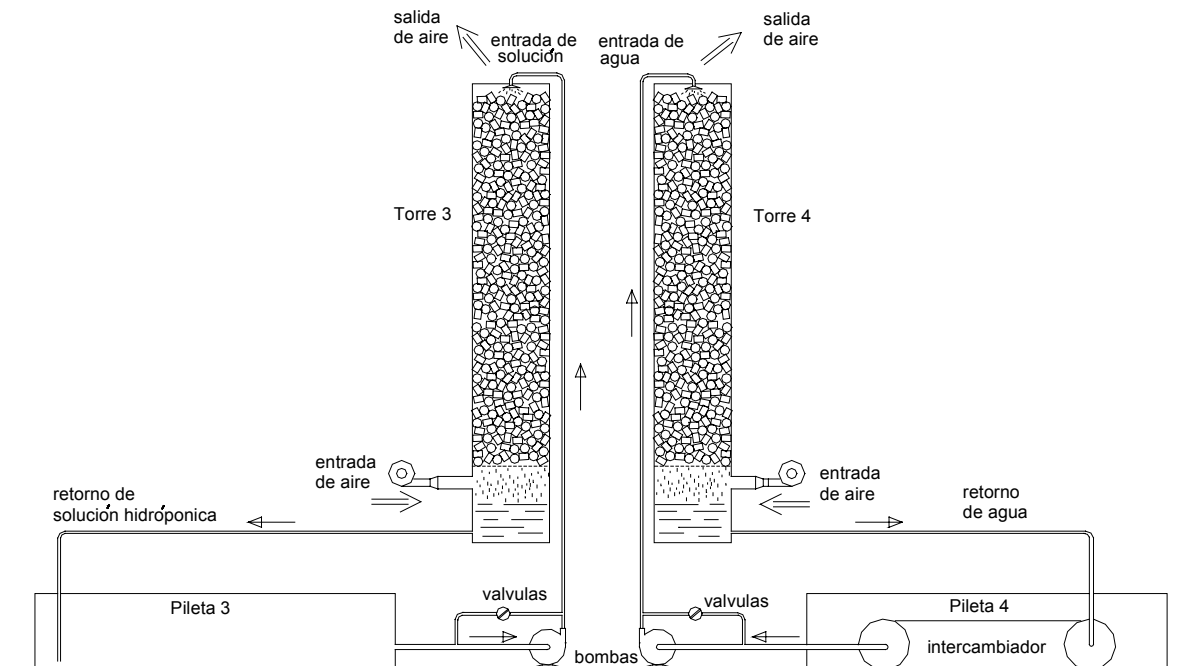


Figura 1 - Esquema de sistemas de enfriamiento

El intercambiador está construido en caño de PVC de 0,010 m de diámetro, tiene una longitud de 8,5 m, encontrándose inmerso en una de las piletas destinada a cultivo. El agua es impulsada mediante una pequeña electrombomba desde el intercambiador a la torre de enfriamiento, siguiendo un circuito cerrado. El caudal se mantuvo constante en 0,21 Kg/s.

Las torres de enfriamiento ensayadas son idénticas. Están construidas en chapa galvanizada; sus dimensiones son: 0,28 m de diámetro y 1,50 m de logitud. Fueron recubiertas internamente con una manga plástica, para evitar que la solución nutritiva que circula en una de ellas, provoque corrosión en la chapa o bien se altere en contacto con ésta. El relleno está constituido por anillos de tipo raschig, de 0,030 m de diámetro y 0,035 m de largo, cortados de caño de PEBD. Se colocaron 706 anillos/metro de altura

de relleno, sostenido mediante una malla plástica, colocada a 0,30 m del ducto de entrada de aire. La altura del relleno fue 0,95 m, con un peso total de 3,5 Kg. Las características de los anillos son: Diámetro 0,030 m. Largo: 0,035 m. Peso: 0,0052 Kg. Superficie de intercambio: $6,6 \cdot 10^{-3} \text{ m}^2$. Superficie específica: $1,26 \text{ m}^2/\text{Kg}$.

El aire fue impulsado a ambas torres simultáneamente mediante un ventilador centrífugo de 80W, recibiendo cada una un caudal constante de 0,017 Kg/s. Para evaluar los resultados de los sistemas con mayor temperatura ambiente, el aire fue calentado mediante una resistencia eléctrica antes de ingresar a las torres. La temperatura del aire se incrementó así en 9 grados respecto de la del ambiente.

Se registraron las temperaturas de cada pileta, del ambiente interior del invernadero, del ambiente exterior, de entrada y de salida de cada torre, con un datalogger Nudam 1611, con intervalos 900 s. Manualmente se tomaron las temperaturas de bulbo seco y de bulbo húmedo del ambiente y de la salida de cada torre, usando un psicrómetro de Mercurio.

El volumen de la solución nutritiva de la Pileta 3 fue de 700 L y el de la Pileta 4 de 696 L. El nivel de líquido de cada pileta ensayada se controló con un calibre, reponiendo el agua evaporada al final de la experiencia. Se controlaron la conductividad eléctrica y el pH de cada pileta al inicio y al final de la experiencia, luego de efectuar la reposición de agua necesaria.

La experiencia se inició a horas 14, con las piletas a una temperatura de 30 °C, funcionando las torres desde entonces hasta horas 9 del día siguiente.

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

En el gráfico de la figura 2 se presenta la evolución de las temperaturas ambiente, del invernadero y de las piletas donde se observa que la temperatura inicial de las piletas (14 horas) es de 30°C, descendiendo paulatinamente debido al funcionamiento de las torres, aunque mantiene valores superiores a 26°C hasta las 20 horas en un caso y en el otro hasta las 2 horas del día siguiente.

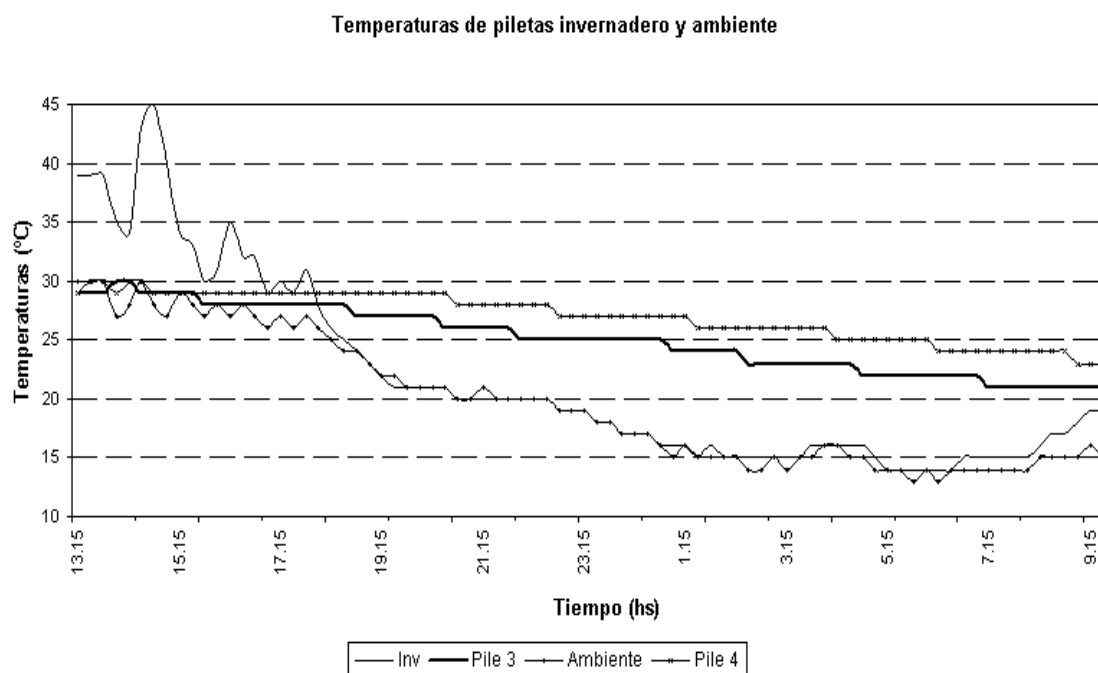


Figura 2 - Evolución de Temperaturas de piletas invernadero y ambiente

Durante el período de funcionamiento de ambos sistemas, la evaporación de agua en la torre del sistema directo, fue del 1,3% del volumen de solución de la pileta correspondiente. Esta pérdida se considera despreciable, aunque en condiciones normales de funcionamiento, debe reponerse el agua evaporada, para mantener la presión osmótica de la solución, permitiendo que el cultivo absorba agua y nutrientes sin afectar su crecimiento.

Las determinaciones de conductividad eléctrica de la solución hidropónica al inicio y al final de la experiencia demuestran que su composición no fue alterada, factor de gran relevancia pues el cultivo que se desarrolle en dicha solución no se verá afectado por el sistema de enfriamiento planteado.

En las figuras 3 y 4 se muestran, para cada uno de los sistemas, la evolución de las siguientes temperaturas: piletta de cultivo y líquido a la entrada y a la salida de la torre.

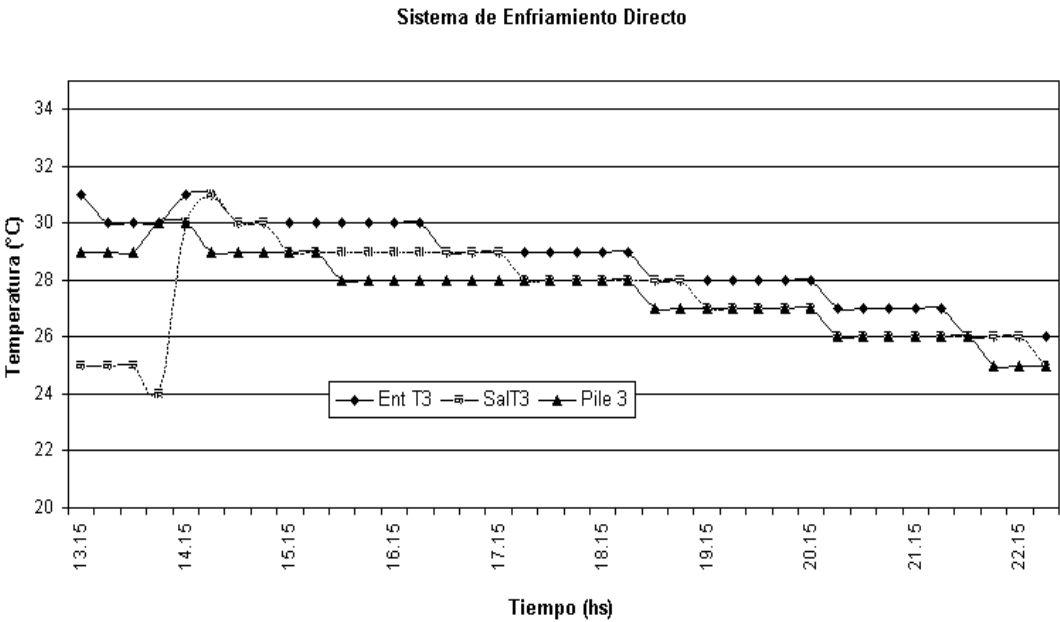


Figura 3. Evolución de temperaturas en sistema Directo

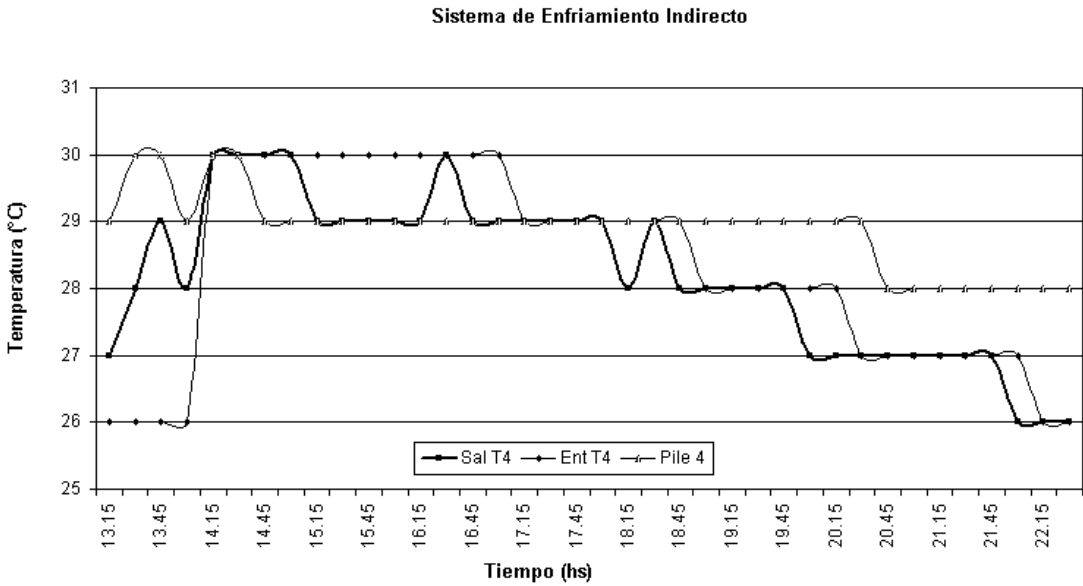


Figura 4 Evolución de temperaturas en sistema Indirecto

La tabla 1 indica las condiciones del aire a la entrada de ambas torres y la tabla 2 muestra las condiciones del aire a la salida de cada torre luego de que ambos sistemas estuvieron en funcionamiento por un período de 5 horas.

hora	Temperatura bulbo seco °C	Temperatura bulbo húmedo °C	Humedad absoluta g agua/Kg aire seco
14:00:00	31	19	13
16:45:00	40	22	12,5
19:00:00	34	21	7

Tabla 1: Condiciones del aire a la entrada de las torres.

Hora	Temperatura bulbo húmedo Torre 3 (°C)	Temperatura bulbo seco Torre 3 (°C)	Temperatura bulbo húmedo Torre 4 (°C)	Temperatura bulbo seco Torre 4 (°C)
19:15:00	22	26	22	26

Tabla 2: Condiciones del aire a la salida de cada torre.

En cuanto al planteo de las condiciones de funcionamiento de la torre, se tiene en cuenta que una cantidad limitada de líquido se pone en contacto con un caudal de aire lo suficientemente grande como para que sus condiciones de humedad y temperatura de entrada y de salida de la torre no difieran apreciablemente. Dado que la fase líquida y la gaseosa se encuentran a la misma temperatura inicialmente, si no existe intercambio de calor entre la torre y el entorno, la vaporización disminuirá la temperatura del líquido, estableciendo un gradiente de temperatura en la interfase gas líquido, que permitirá la transmisión de calor desde el seno de la fase líquida hacia la gaseosa. Este proceso determina que la solución se enfriará hasta que ambos flujos energéticos se igualen, lo que ocurrirá cuando la temperatura del líquido sea igual a la temperatura de bulbo húmedo del aire.

Los valores de las temperaturas de bulbo húmedo a la entrada y a la salida de cada torre demuestran que sus condiciones de humedad y temperatura no cambian apreciablemente, comprobando que el aire se encuentra en exceso con respecto al caudal de líquido circulante. Por esta razón, la temperatura del líquido podrá disminuir hasta 21 °C, correspondiente a la temperatura de bulbo húmedo del aire en contacto con él.

Durante la operación de ambos sistemas, en todos los casos, este límite no fue alcanzado, aunque la solución hidropónica disminuyó su temperatura alcanzando valores adecuados para el cultivo de las especies vegetales de interés. Esto permitiría continuar enfriando dicha solución, en caso de ser necesario.

Considerando la figura 2 queda de manifiesto la mayor eficiencia del sistema directo de enfriamiento, dado el menor tiempo en el que se alcanza una temperatura establecida.

Con los datos de temperaturas de entrada y de salida del líquido de cada torre, del ambiente del invernadero, de la solución hidropónica en cada una de las piletas, y de las correspondientes al salto térmico total experimentado por cada solución entre las 14 y las 20 horas, se realiza el balance energético total para cada sistema, con base en las siguientes consideraciones:

- 1-La energía total disipada en la torre de enfriamiento (Etorre) se calcula en función del caudal de líquido y de sus temperaturas de entrada y de salida de la torre, para cada intervalo de tiempo de medición, integrándose para todo el período.
- 2 - La cantidad total de calor extraída de la solución (Esolución) se calcula mediante los saltos térmicos totales experimentados en las piletas al inicio y al final del período considerado.
- 3 - El intercambio calórico entre la pileta y el invernadero (Einvernadero) se obtiene a partir de un coeficiente convectivo global para la superficie total de las piletas, que fue determinado experimentalmente en un trabajo anterior. Echazú et al. (1999). El mismo dió un valor de 33,26 W/m² s °C.
- 4 - La energía total disipada en la torre de enfriamiento (Etorre) debe ser igual a la suma de la cantidad total de calor extraída de la solución (Esolución) y del intercambio calórico entre la pileta y el invernadero (Einvernadero).

De los valores obtenidos, mostrados en la tabla 3, surge que el balance realizado es razonable

Energía MJ	Sistema directo	Sistema indirecto
Etorre	18,81	8,6
Esolución	8,7	2,9
Einvernadero	11,3	5,1

Tabla 3: Balance energético comparativo

Por otro lado, teniendo en cuenta que la energía disipada en la Torre 3 es aportada por el enfriamiento de la solución nutritiva, se calcula la cantidad de agua evaporada, resultando un valor de 8,3 Kg, considerado muy próximo al valor medido de 9 Kg.

En el presente trabajo se caracterizó el relleno de las torres, aunque no se avanzó en la etapa de dimensionamiento de las mismas, lo cual será motivo de estudio, para permitir la implementación de este sistema en otros invernaderos y para lograr el acondicionamiento necesario en verano para especies que puedan ser más exigentes térmicamente.

CONCLUSIONES

Se han ensayado comparativamente dos sistemas de enfriamiento aplicables a la solución nutritiva usada en los cultivos hidropónicos con sistema de bandejas flotantes en invernadero, evaluando los posibles efectos de su aplicación sobre la solución usada en el cultivo.

Posterioros ensayos con cultivos permitirán su evaluación agronómica, haciendo extensivos los resultados a otras situaciones de interés.

Ambos sistemas resultan económicos y de fácil construcción, requiriendo solamente la instalación de las torres de enfriamiento en las inmediaciones del invernadero, por lo que no afectan el normal funcionamiento de los mismos. Los sistemas ensayados son modulares, disponiéndose una torre de enfriamiento para cada pileta, lo que constituye una ventaja al aplicarlo al diseño de otros invernaderos. La caracterización del relleno de las torres permite la posterior es dimensionamientos de sistemas similares.

Aunque es necesario proteger las torres de eventuales lluvias o contingencias climáticas que puedan alterar las condiciones de las soluciones nutritivas, el reducido espacio que ocupan, hace que las complicaciones y costos para su construcción sean irrelevantes.

El sistema de enfriamiento directo tiene la ventaja de no requerir otra bomba para su funcionamiento, usando la misma ya instalada para la recirculación de la solución nutritiva. La manga plástica que recubre interiormente la torre, resultó adecuada para evitar tanto la corrosión, como las alteraciones químicas de la solución derivadas de su reacción con el metal. Esto se logra de una manera sencilla, sin mayor costo ni dificultades de instalación.

Los sistemas propuestos con la posibilidad de reducir la temperatura de la solución proporcionan condiciones de cultivo más controladas, que permitirán cultivar especies más exigentes, expandiendo el tiempo real de uso del invernadero, a épocas de calor.

Considerando la velocidad de enfriamiento de la solución nutritiva, se evidencia una mayor eficiencia del sistema directo. Las medidas de conductividad eléctrica de la solución nutritiva, realizadas antes y después de la experiencia, no evidenciaron alteraciones en las concentraciones de nutrientes en la solución, por lo que es esperable que el sistema no produzca precipitación o pérdida de nutrientes.

Aunque el sistema de enfriamiento indirecto no requiere de revestimiento interno de la torre, pero sí del empleo de una bomba auxiliar y de un intercambiador de calor, lo que hace que sus costos sean algo mayores y su eficiencia menor.

El balance térmico presentado ajusta razonablemente, dado que la energía total disipada en la torre de enfriamiento (Etorre) prácticamente iguala la suma de la cantidad total de calor extraída de la solución (Esolución) y del intercambio calórico entre la pileta y el invernadero (Einvernadero), lo que se corrobora además por la coincidencia entre los valores medido y calculado de la masa de agua evaporada en la torre

REFERENCIAS

Kreith, F. Principios de Transferencia de Calor. Herrero Hnos., Sucesores S.A.. México. 1970. pp 615.

R. Echazú, L. Saravia, M. Quiroga, P. Robredo y C. Cadena. (1999). Acondicionamiento Térmico de Verano, en "*Avances en Energías Renovables y Medio Ambiente*", Vol. 3. N° 1, pp 2.25

ABSTRACT

This paper deals with two different refreshing systems, direct and indirect, used to cool the nutritive solutions of a Hydroponic Greenhouse culture. Both closed-circuit systems consist in a packed tower, placed outside the Greenhouse, and a cropping bed filled with hydroponic solution. The solution of the direct system is pumped into the tower to be cooled. The cropping bed of the indirect system has inside a heat exchanger, filled with water. In this case, the water is pumped from the exchanger to the tower. A thermal balance for both systems is presented, as well as the first characteristics of the rings of the packed towers.